

## Choix et optimisation de l'outil et des paramètres de soudage en Friction Stir Welding

François GRATECAP, Guillaume RACINEUX, Arnaud POITOU

*Institut de recherche en génie civil et mécanique (GeM)  
UMR CNRS 6183, Centrale Nantes, Université de Nantes  
1, rue de la Noë – 4321 Nantes Cedex 3  
françois.gratecap@ec-nantes.fr ; guillaume.racineux@ec-nantes.fr*

### Résumé :

*Depuis 15 ans, le Friction Stir Welding (FSW) a suscité un intérêt grandissant tant dans le secteur industriel que dans celui de la recherche. Le procédé résulte d'un apport de chaleur par frottement entre l'outil et la pièce et d'une forte déformation plastique dans le matériau. Actuellement, malgré un nombre d'étude important, l'optimisation du procédé pour un matériau donné passe le plus souvent par des itérations expérimentales basées sur un couplage essais et observations. L'objectif de cette étude est donc de mettre en place un algorithme de calcul basé sur une modélisation thermique et géométrique du procédé, afin de pouvoir définir l'ensemble des paramètres de soudage permettant d'avoir une bonne soudure selon les besoins définis par l'utilisateur.*

### Mots-clefs : FSW ; Outil ; Optimisation

### Abstract :

*For 15 years, Friction Stir Welding (FSW) has known an increasing interest in both industry and academia. The process results from a heat generation by friction between the tool and the base metal and from an important plastic deformation in material. Currently, in spite of a significant number of studies, the process optimization for a given material generally passes by experimental iterations based on tests and observations. The objective of this study is thus to set up a calculation algorithm based on a thermal and geometrical modelling, in order to be able to define all the welding parameters making it possible to have a good welding according to user needs'.*

### Key words: FSW; Tool; Optimization

## 1 Introduction

Le FSW (Friction Stir Welding) est un procédé de soudage en phase solide qui a été développé dans les années 90 par TWI (The Welding Institute, Cambridge, UK). Le procédé consiste à chauffer et à malaxer la matière dans la zone à souder, pour cela, on utilise un outil cylindrique qui comprend un épaulement et un pion. L'épaulement frotte à la surface des pièces à souder échauffant ainsi la matière tandis que le pion malaxe la matière à l'état pâteux réalisant ainsi une liaison à l'échelle atomique. Le FSW présente de nombreux avantages : vitesse de soudage élevée, pas de porosités, peu de contraintes résiduelles, pas de métal d'apport, pas de fumée, soudage hétérogène possible etc. Il peut être utilisé dans de multiples positions et pour de nombreuses géométries de pièces Tretyak (2002). Cela fait du FSW un procédé d'usage déjà utilisé dans bon nombre d'applications industrielles tels que le transport maritime, ferroviaire ou aérien Mishra (2003).

Bien qu'il s'agisse d'un procédé dont le principe est simple, il met en jeu des phénomènes complexes (couplages thermomécanique, changements métallurgiques...) qui sont à l'origine

d'un grand nombre d'études. On peut noter des travaux concernant la prévision de l'influence des paramètres de soudage des paramètres de soudage et de la géométrie de l'outil sur la génération de chaleur Mishra *et al.* (2005), sur l'écoulement de la matière Krishnan (2001) sur la formation des défauts Chena *et al.* (2006) Kim *et al.* (2006). De nombreuses modélisations thermomécaniques plus ou moins raffinées permettent de mieux comprendre et de reproduire les phénomènes physiques observés Ulysse (2002) Song *et al.* (2003) Schmidt *et al.* (2004) Colegrove *et al.* (2002). Parallèlement à l'amélioration des connaissances concernant la cinématique d'écoulement de la matière la géométrie des outils a beaucoup évolué. On est progressivement passé d'un pion conique fileté à un pion Whorl<sup>TM</sup>, puis à un pion MX triflutes<sup>TM</sup>. Brown (2001) a montré que l'emploi de telles géométries permet de réduire les efforts de soudage tout en augmentant la génération de chaleur et le malaxage de la matière. De nouvelles évolutions ont récemment eu lieu avec l'A-skew Tool pour améliorer encore la vitesse de soudage maximum Dubourg *et al.* (2006).

Toutefois, on constate que bon nombre d'auteurs se posent toujours des questions sur la façon d'optimiser la géométrie des outils ou les paramètres de réglage. Dans une étude bibliographique récente, Dubourg *et al.* (2006) fait une régression linéaire sur la valeur du diamètre de l'épaule et sur la taille du pion en fonction de l'épaisseur des tôles. Il en ressort une tendance non expliquée qui lie les paramètres entre eux. On constate que les géométries utilisées sont obtenues de façon empirique sans fondement théorique.

Dans cette étude nous proposons une méthodologie qui permet de définir, a priori, les paramètres de soudage, les paramètres géométriques et les paramètres de réglage d'un outil conique pour un matériau donné dans le cas d'un soudage en position. Les paramètres de soudage sont : la vitesse de rotation ( $\omega$ ) et vitesse d'avance ( $V_f$ ). La géométrie est définie par le diamètre de l'épaule ( $D_s$ ), par l'angle de dépouille ( $\gamma$ ), par le diamètre du pion ( $D_p$ ), son angle ( $\beta$ ), sa hauteur sous l'épaule ( $h$ ) et son rayon de raccordement ( $R$ ). Le réglage de l'outil est défini par son inclinaison ( $\alpha$ ) et la distance entre le bas du pion et le dessous des tôles ( $\delta$ ).

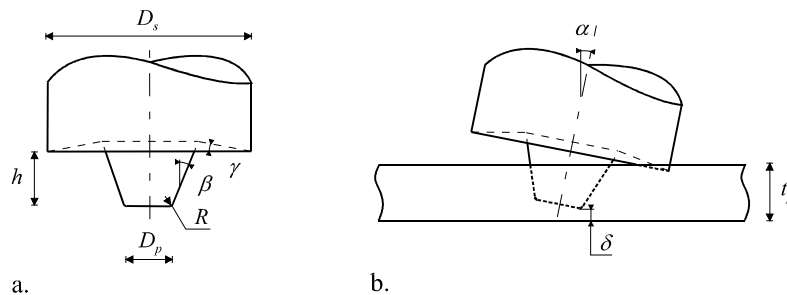


FIG. 1 - a. Définition géométrique de l'outil - b. Paramètres de mise en position de l'outil

L'algorithme d'optimisation mis en place dans cette étude est présenté dans la section (3) et s'appuie sur une modélisation thermique et géométrique du procédé qui sont présentées dans la section (2). La démarche proposée est ensuite discutée dans la section (3). Finalement nous terminons en proposant un certain nombre de perspectives à cette étude.

## 2 Modélisation

### 2.1 Modèle thermique

En utilisant un modèle simplifié Gratecap *et al.* (2005) (source mobile ponctuelle + modèle de chaleur + influence de la température sur les propriétés matériau) on montre logiquement, que la température de soudage diminue lorsque l'on augmente la vitesse d'avance (pour une

vitesse de rotation donnée) et que la température augmente lorsque l'on augmente la vitesse de rotation (pour une vitesse d'avance donnée) :

$$T - T_0 = \frac{Q_s}{2\pi k} \exp\left(-\frac{V_f \xi}{2a}\right) \exp\left(-\frac{V_r \psi}{2a}\right) \frac{1}{\psi} \quad (0)$$

où  $T_0$  est la température initiale,  $k$  la conductivité thermique,  $a$  la diffusivité thermique,  $\psi$  la distance à la source et  $\xi$  la coordonnée dans la direction de soudage. On montre également qu'il est possible d'optimiser la vitesse d'avance, tout en conservant la température de soudage constante, si l'on augmente en conséquence la vitesse de rotation. Sur la figure 2 nous avons tracé plusieurs isothermes dans le cas d'alliages d'aluminium de la série 6061 T6. En effectuant de nombreuses expériences, Okamura (2000) a défini une zone de soudabilité (en grisé sur la figure 2). Nous pouvons constater que cette zone se situe approximativement entre les isothermes à 500°C et à 550°C ce qui paraît tout à fait raisonnable par rapport aux températures généralement mesurées. Finalement, dans le cas de plaques minces, il est possible d'évaluer très simplement un ordre de grandeur raisonnable des vitesses de rotation et d'avance de l'outil pour un matériau donné en fonction de la température de soudage souhaitée. Ce résultat peut-être généralisé au cas des plaques épaisses par une simulation par éléments finis.

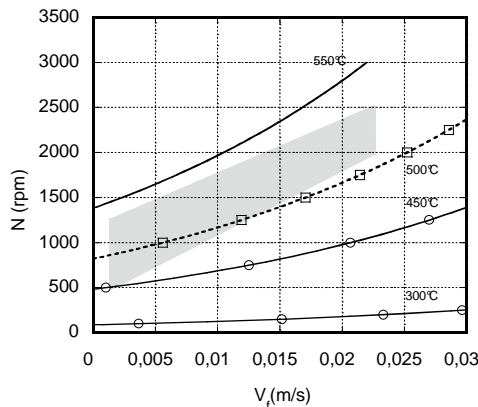


FIG. 2 - Conditions de soudage en fonction de la vitesse d'avance et de la vitesse de rotation pour des plaques de 5 mm d'épaisseur en 6061 T6.

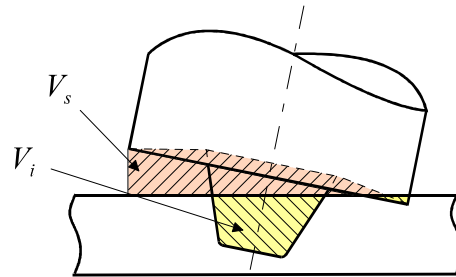


FIG. 3 - Règle des volumes

## 2.2 Modèle géométrique

Le FSW est un procédé de soudage sans apport extérieur de matière, ce qui signifie qu'il faut, autant que possible, limiter la perte de matière lors du pointage (par expulsion hors de l'épaulement), et pendant le soudage (par formation de bavures). D'autre part, pour que l'apport de chaleur par cisaillement soit optimal, il faut que l'espace compris entre l'épaulement et les tôles soit plein. Pour cela nous montrons qu'il faut vérifier trois règles que nous appellerons : la règle des volumes, la règle des surfaces et la règle des débits.

(i) *Règle des volumes* - Dans la phase de pointage, l'outil descend progressivement dans la tôle jusqu'à ce que le pion atteigne la distance de réglage  $\delta$ . Les paramètres géométriques et de réglages ( $\alpha$ ,  $\delta$ ) de l'outil doivent permettre de conserver, entre l'épaulement et la tôle, le volume de matière refoulé par le pion. Par ailleurs, il ne faut pas surdimensionner cet espace pour assurer un cisaillement sur la totalité de l'épaulement. Finalement il faut que le volume du pion "immergé" dans la tôle ( $V_i$ ) soit égal au volume "de stockage" disponible entre l'épaulement et la tôle ( $V_s$ ) (voir figure 3) :

$$V_i = V_s. \quad (1)$$

(ii) *Règle des débits* - Dans la phase de soudage, le pion entraîne de la matière par cisaillement en amont et la refoule (respectivement  $Q_p$  et  $Q_r$  sur la figure 4). Il faut ensuite la

replacer dans la tranchée ouverte en aval. La rotation de l'outil permet de reboucher cette tranchée. Si l'on néglige le débit d'entraînement du pion ( $Q_p$ ) par rapport au débit de refoulement ( $Q_r$ ) alors, l'essentiel de la matière déplacée par le pion passe entre l'épaulement et la tôle. Dans ces conditions, il faut, à la fois, que l'espace libre entre l'épaulement et la tôle et la vitesse de rotation de l'outil, soit suffisants pour que le débit de matière refoulé ( $Q_r$ ) par le déplacement du pion à la vitesse d'avance  $V_f$  soit compensé par le débit d'entraînement de l'épaulement ( $Q_s$ ). Suivant ce raisonnement nous définissons la règle des débits :

$$Q_s \geq Q_p. \quad (2)$$

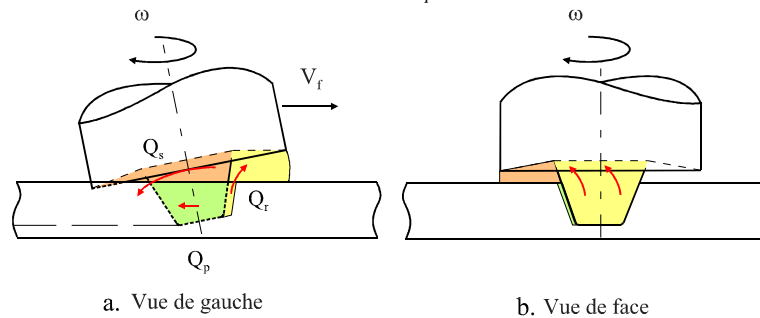


FIG. 4 – Ecoulements

(iii) *Règle des surfaces* - Pour consolider la matière après le passage du pion, il est nécessaire d'appliquer un effort de forgeage  $F$  (figure 5). Pour cela, l'outil doit être incliné d'un angle  $\alpha$  et avoir un engagement verticale  $a_z$  dans la tôle. Afin de ne pas trop diminuer l'épaisseur de la soudure par rapport à l'épaisseur initiale des tôles, seule une largeur  $l_f$  de l'outil est engagée dans la matière. Dans ces conditions, il demeure nécessairement un bourrelet sur les bords du cordon de soudure. Si l'on ne veut pas vider le volume de matière stocké entre l'épaulement et la tôle, la perte de matière due à la formation de ces bourrelets doit être compensée par l'apport de matière provoqué par l'engagement vertical de l'outil  $a_z$ . Cette condition est vérifiée si et seulement :

$$S_i = S_e \quad (3)$$

où  $S_i$  est la section immergée et  $S_e$  la section du bourrelet. Nous appellerons, règle des surfaces, cette condition.

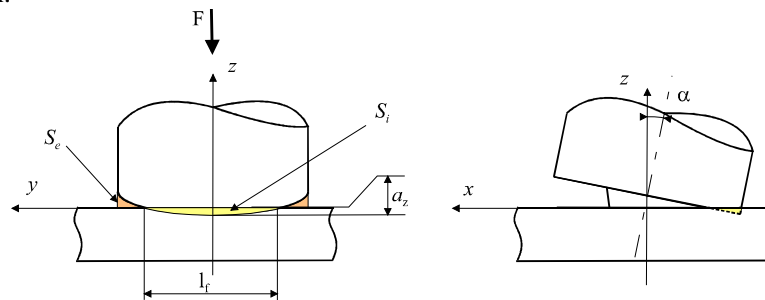


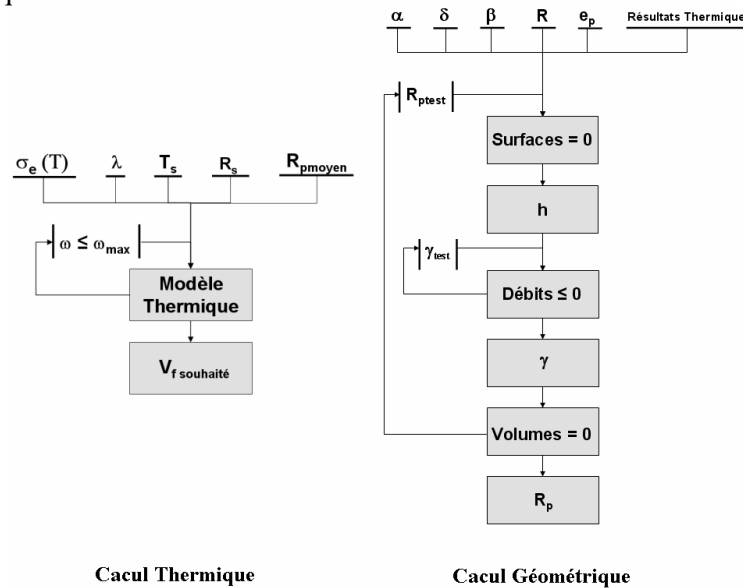
FIG. 5 - Règle des surfaces

### 3 Optimisation

Le point de départ de l'optimisation est le modèle thermique présenté dans la section (2). On a montré que pour le cas des tôles minces, il est possible, connaissant le diamètre de l'épaulement et du pion de l'outil ainsi que l'évolution de la limite d'élasticité en fonction de la température, de déterminer les vitesses d'avance et de rotation de l'outil pour avoir une température de soudage appropriée. Généralement dans la littérature on montre qu'il faut souder

à une température proche de  $0,7 T_f$ , où  $T_f$  est la température de fusion du matériau exprimée en Kelvin.

Nous avons également montré dans la section 2 que la géométrie de l'outil devait respecter trois règles indépendantes pour qu'il puisse fonctionner dans les meilleures conditions. Partant de là nous définissons un algorithme de calcul comportant deux étapes (figure 6). Les paramètres d'entrée sont soulignés et les paramètres d'optimisation entre barres. La première étape thermique permet de définir les vitesses d'avance et de rotation pour obtenir la température visée. La vitesse de rotation doit être compatible avec celle de la broche. La seconde étape permet d'ajuster les paramètres géométriques de l'outil afin de respecter les trois règles géométriques.



Cacul Thermique

Cacul Géométrique

FIG. 6 - Algorithme de calcul

Nous avons appliqué cet algorithme pour différents paramètres d'entrées, la figure 7 récapitule les principaux résultats obtenus. Chaque ligne du tableau correspond à un paramètre. L'outil 1 correspond à un outil de référence et les outils de 2 à 9 sont obtenus en faisant varier un des paramètres d'entrées de l'outil de référence (représenté en gris foncé). Les outils 1.2 à 1.5 ont la même géométrie que l'outil 1, mais des réglages différents. Les paramètres en gris clair sont ceux calculés et les autres sont fixés en entrée et identiques à ceux de l'outil de référence. Les trois dernières lignes sont des indicateurs du respect des règles des volumes, des débits et des surfaces.

Variables	Outil 1 (référence)	Outil 2	Outil 3	Outil 4	Outil 5	Outil 6	Outil 7	Outil 8	Outil 9	Outil 1.2	Outil 1.3	Outil 1.4	Outil 1.5
alpha (°)	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
beta (°)	15	15	25	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
delta (mm)	0,10	0,10	0,10	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,00	0,40	0,10	0,10
ep (mm)	4	4	4	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4
gamma (°)	4,41	3,44	4,82	4,41	3,44	4,64	6,70	1,89	19,08	4,41	4,41	4,41	4,41
h (mm)	4,15	4,09	4,18	4,05	2,07	4,15	4,12	4,17	4,10	4,15	4,15	4,15	4,15
Rayon (mm)	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
Rs (mm)	10	10	10	10	10	10	8	10	10	10	10	10	10
Rp (mm)	3,13	2,61	2,66	3,18	4,66	3,23	2,27	2,83	4,15	3,13	3,13	3,13	3,13
Rp2 (mm)	4,24	3,70	4,61	4,27	5,21	4,34	3,37	3,95	2,25	4,24	4,24	4,24	4,24
Vf (mm/min)	200	200	200	200	200	200	200	100	200	200	200	500	100
w (rpm)	450	450	450	450	450	450	450	450	225	450	450	450	450
Température	464,5	453,9	463,6	464,3	460,5	466,4	407,4	464,2	416,1	467	467	451	463
% Tf	0,79	0,78	0,79	0,79	0,79	0,79	0,73	0,79	0,74	0,79	0,79	0,78	0,79
Erreur Volume (%)	0,50	0,17	0,35	0,05	0,42	0,32	0,17	0,16	0,16	23,53	-40,00	-0,22	-0,22
Erreur Debit (%)	-0,02	-0,42	-0,15	-1,28	-0,08	-0,08	-0,41	-0,75	-0,27	2,36	-10,59	60,43	-101,16
Erreur Surface (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,79	-72,52	0,47	0,47

FIG. 7 - Influence des différents paramètres sur la géométrie de l'outil.

Le tableau ci-dessus permet de mettre en évidence un certains nombre de points : (i) une diminution de l'angle de tilt engendre une diminution de l'angle de dépouille du diamètre de l'épaulement et du diamètre du pion, (ii) une diminution du diamètre de l'épaulement engendre une augmentation de l'angle de dépouille et une diminution importante du diamètre du pion (pion élancé), (iii) une diminution de la vitesse d'avance engendre une diminution du diamètre du pion ainsi que de l'angle de dépouille. On peut également constater la qualité d'une soudure pour un outil donné, va être extrêmement sensible au réglage en hauteur. Par ailleurs, il est possible d'utiliser une géométrie donnée pour un rapport  $N/V_f$  supérieur au rapport optimal lié à cette géométrie.

#### 4 Conclusion

Dans cette étude nous avons proposé, pour une opération de soudage en position par FSW, une méthodologie qui permet d'optimiser les conditions de soudage (vitesse d'avance, vitesse de rotation), la géométrie d'un outil conique et ses paramètres de réglages. Nous montrons que la géométrie optimale d'un outil conique dépend à la fois des conditions de soudage et du matériau à assembler. Pour compléter cette étude, nous envisageons de valider la méthodologie d'optimisation sur différents alliages métalliques.

#### Références

- Brown, I.H. 2001 Friction Welding at Adelaide University. *Challenges for innovation in the new millenium, WTIA 49th Annual Conference*.
- Chena, H.B., Yan, K., Lin, T., Chena, S.C., Jiang, C.Y. & Zhaob, Y. 2006 The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds. *Materials Science and Engineering*. **A 433**, 64-69
- Colegrove, P.A. & Shercliff, H.R. 2005 3-Dimensional CFD modelling of flow round a threaded friction stir welding tool profile. *Materials Processing Technology*.
- Dubourg, L., Gagnon, F.O., St-Georges, L., Jahazi, M. & Hamel, F.G. 2006 Process window optimization for FSW of thin and thick sheet Al alloys using statistical methods. *6th symposium of Friction stir welding, St Sauveur, QC, Canada*.
- Gratecap, F., Racineux, G. & Poitou, A. 2005 Influence of process parameters on friction stir welding conditions - Application to 6061 T6 Al alloy thin plates. *ESAFORM 2005*.
- KIM, Y.G., Fujii, H., Tsumura, T. & Nakata, K. 2006 Three defect type in friction stir welding of aluminium die casting alloy. *Materials Science and Engineering*. **A415**, 250-254
- Krishnan, K.N. 2001 On the formation of onion rings in friction stir welding. *Materials Science and Engineering*. **A327**, 246-251
- Mishra, R.S. 2003 Advanced materials & Processes. **Vol. 161**, 43-46
- Mishra, R.S. & Ma, Z.Y. 2005 Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering*. **R-50**, 1-78
- Okamura, H. 2000 Visualization of material flow in an Autogenous Friction Stir Weld. *J Japan Weld Soc 2000*. **69 (7)**, 565-571
- Schmidt, H. & Hattel, J. 2004 A local model for the thermomechanical conditions in friction stir welding. *Modelling And Simulation In Material Science And Engineering*. **13**, 77-93
- Song, M. & Kovacevic, R. 2003 Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. **43**, 605-615
- Tretyak, N.G. 2002 Friction stir welding of aluminium alloys. *Paton Welding Journal*. **Vol. 83**, 277-282
- Ulysse, P. 2002 Three-dimensional modeling of the friction stir-welding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. **42**, 1549-1557